

2024 구조물 내진설계 경진대회 Seismic Structural Design Contest 2024

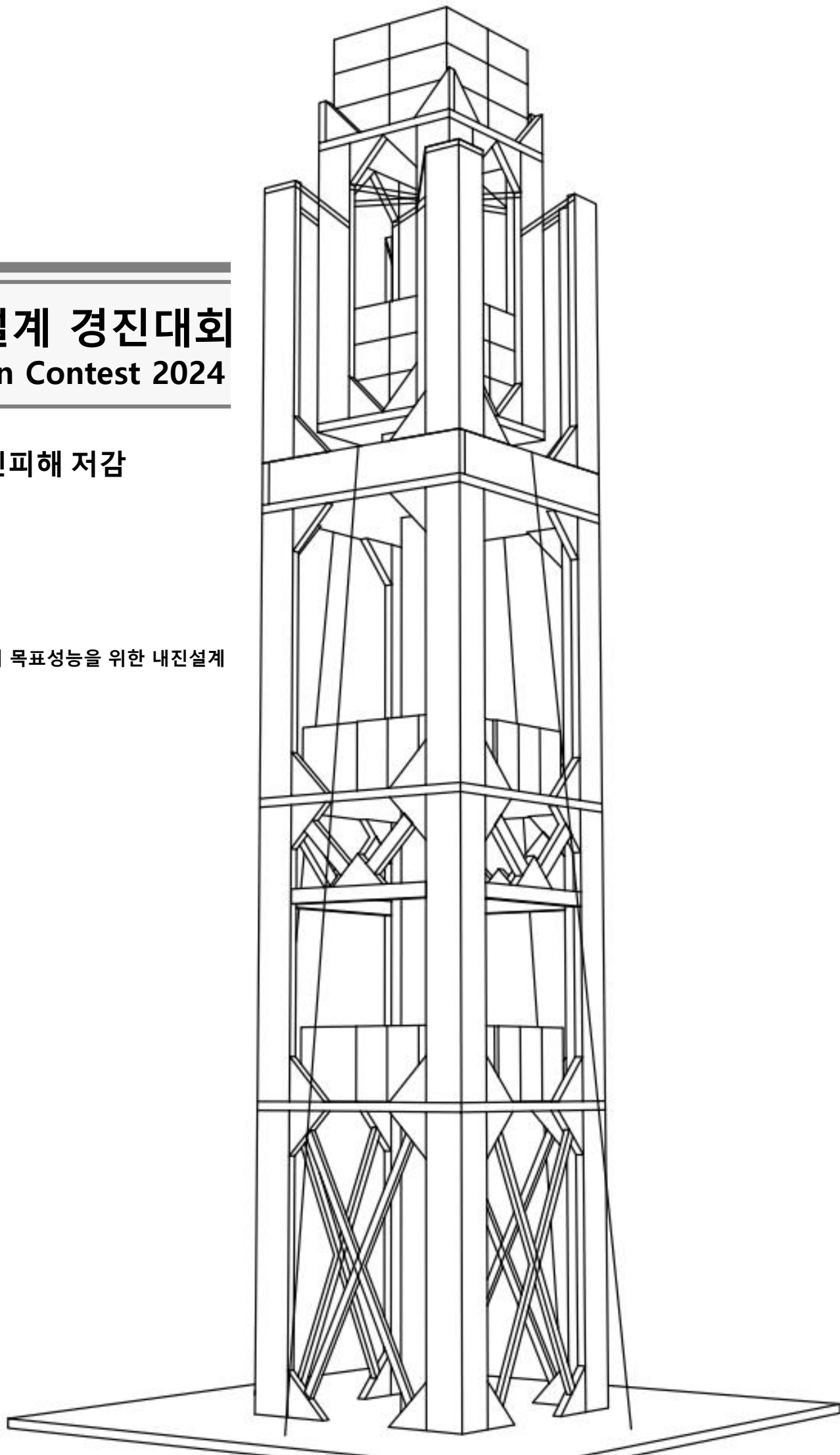
내진설계를 통한 구조물의 지진피해 저감

지도교수 : 신동현 교수님

팀 명 : INNOSYS

대 학 : 부산대학교 건축공학과

제 목 : 탄성을 활용한 구조물의 지진대비 목표성능을 위한 내진설계



목차

01

INTRO

- 팀 소개
- 구조물 심사 기준
- 내진 설계 개념
- 지진파 분석
- 재료 물성치 분석

02

MAIN

- 구조 설계 분석
- 실험 및 분석
- 최종실험
- 면진층 거동 분석
- MIDAS 분석
- 붕괴 메커니즘
- 평면도 & 입면도

03

CONCLUSION

- 시공성 분석
- 경제성 분석

팀 소개

TEAM



부산대학교 건축공학과
INNOSYS

INNOVATIVE STRUCTURE SYSTEM 의 축약어로

혁신적인 구조시스템을 뜻하며 건축구조에 대한 기본 개념을 바탕으로 창의적인 아이디어를 건축구조에 접목시켜 혁신적, 구조시스템을 개발하는 데 이번 대회 목적을 가지고 있습니다.

자문 위원

부산대학교 건축공학과
신동현 자문 및 지도교수

MEMBERS

임광섭 팀장

- 대회규정분석
- 구조물 제작
- 경제성 분석
- 설계제안서 제작

민종현 팀원

- 구조해석
- 구조물 제작
- 시공성 분석
- 마이다스

주승호 팀원

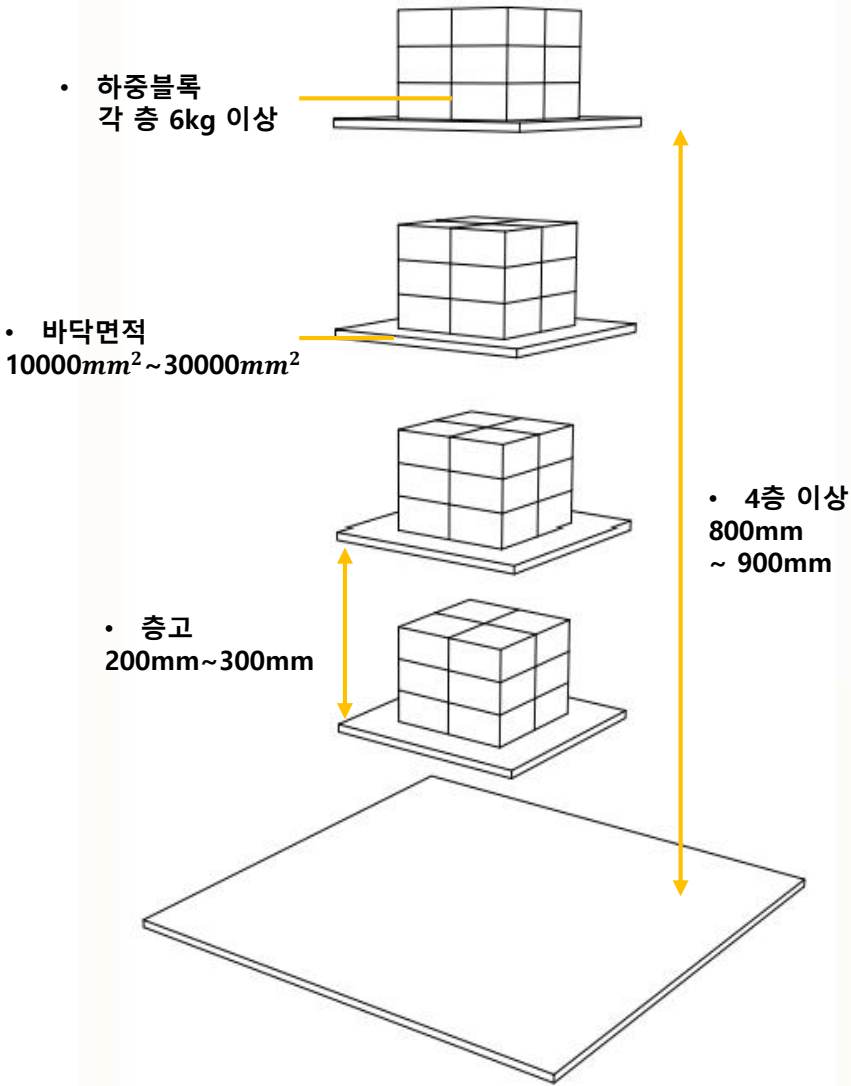
- 구조해석
- 구조물 제작
- 시공성 분석
- 모델링

정현성 팀원

- 구조물 제작
- 경제성 분석
- 시공성 분석
- 물성치 분석

구조물 심사 기준

구조물 심사 기준



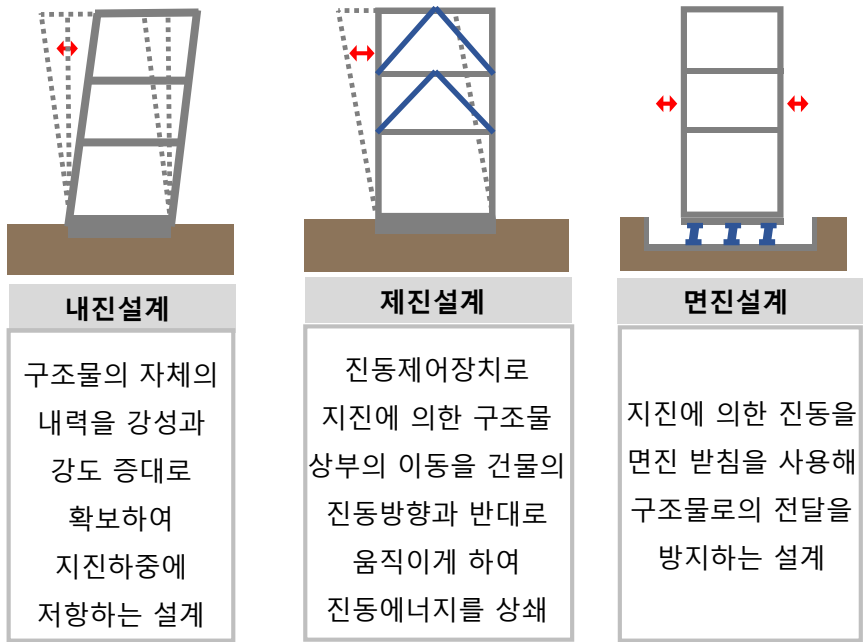
작품 심사기준

- 구조물의 내진설계 목표와 성능수준의 이해
 - 구조물의 지진 시 거동 예측 능력 및 부재강도 평가 능력
 - 500년, 2,400년 빈도 지진발생 시 각각 기능수행, 붕괴방지 수준
- 내진설계
- 설계지진 초과 시 구조물의 붕괴 메커니즘을 고려한 파괴를 유도하는
- 정밀설계
- 시공성, 경제성을 고려, 구조물의 심미성과 창의성을 추구하는 설계
 - 구조해석 능력 외 도면화, 수량산출 및 내역작성 기술

<작품 제작 재료>

재료명	단위	규격	단가(백만원)
MDF Base	개	$400mm \times 400mm \times 6mm$	1개 기본 제공
MDF Strip	개	$600mm \times 4mm \times 6mm$	10
MDF Plate	개	$200mm \times 200mm \times 6mm$	100
고무줄	식	600mm	40
A4지	장	$210mm \times 297mm$	10
접착제	개	20g	200

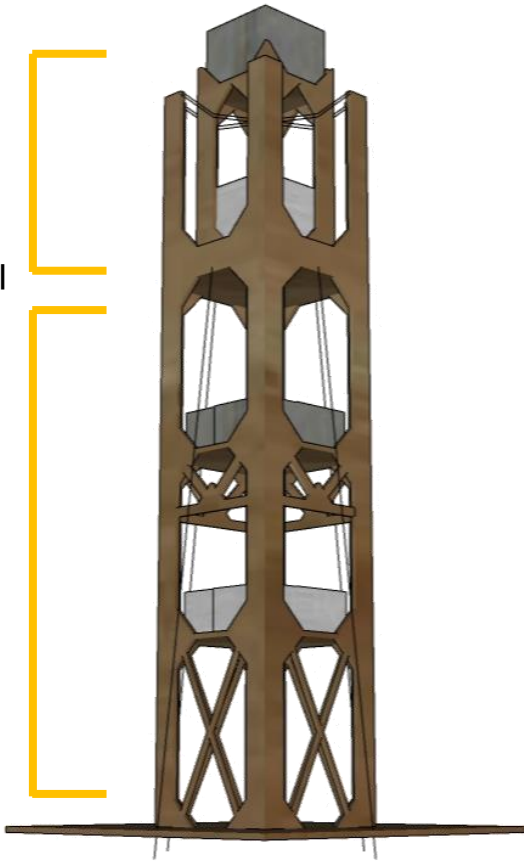
내진 설계 개념



메가 컬럼과 중앙부에 전단벽을 바닥판의 모서리에 배치
가새 및 트러스를 설치하여 강성과 강도를 증가시켜 내진설계를 적용한 후 횡하중에 취약한 상부구조의 붕괴 방지를 위해 4층과 옥상 구조물에 면진 설계를 추가적으로 설계하여 지진하중에 저항하도록 설계를 진행

제진 장치를
활용하여
상층부로 갈수록
심해지는
지진 감쇠
일정 가속도 도달 시
파괴 유도

상부층의 거동을
안정적으로
지지하기 위해
충분한 강성과
강도 확보를 위해
내진설계를 적용



재현주기	500년	2400년
유효수평지반가속도(S)	0.3g	0.6g
위험도계수(I)	1	2
지진구역계수(Z)	0.3g	0.3g

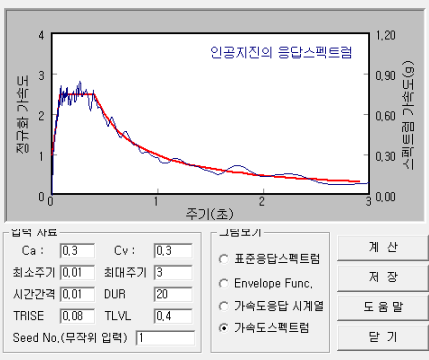
지반응답증폭계수	
단주기(F_a)	1.5
1초 주기(F_v)	1.5

설계 스펙트럼 가속도	500년	2400년
단주기 설계 스펙트럼 가속도(S_{DS})	0.75g	1.5g
1초 주기 설계 스펙트럼 가속도(S_{D1})	0.3g	0.6g
$S_{DS} = S \times 2.5 \times F_a \times 2/3$ $S_{D1} = S \times F_v \times 2/3$		

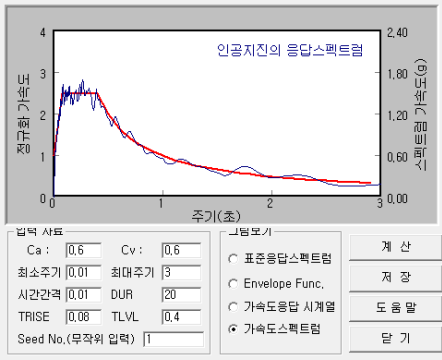
구조물의 고유주기(500년, 2400년)	
$T_o = 0.2 \frac{S_{D1}}{S_{DS}}$	0.05sec
$T_s = \frac{S_{D1}}{S_{DS}}$	0.4sec
T_L	0.4sec

0.08 ~ 0.4sec 에서 설계 스펙트럼 가속도 최대

500년 설계 응답 스펙트럼



2400년 설계 응답 스펙트럼



재료 물성치

고무줄의 탄성계수



	1차 실험
단면적(mm^2)	4.90
변위(mm)	16
탄성계수 (Kg/cm^2)	1.27

Hook's Law

$$E = \frac{\sigma}{\varepsilon} = \frac{PL}{A\Delta L}$$

(고무줄 직경: 2.5mm)

고무줄의 탄성계수는 $1.27Kg/cm^2$ 으로 잘 늘어나면서도 다시 원상태로 돌아오려는 탄성의 성질이 크다. 따라서 본 구조물에 고무줄의 탄성력을 활용하는 방향으로 면진 설계를 진행하고자 한다.

MDF Plate 단일부재 탄성계수 및 휨강도

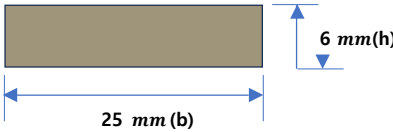


단일부재 물성치 실험	
$P(N)$	9.8
길이(mm)	120
단면 2차 모멘트 (mm^4)	$I_x = 450$
처짐(mm)	0.5
탄성계수(MPa)	1045

• MDF Plate 휨강도

$$M = \frac{FL}{4} = \frac{9.8 \times 12}{4} = 29.4Nm$$

• MDF Plate 탄성계수



$$I = \frac{25 \times 6^3}{12} = 450mm^4$$

$$E = \frac{PL^3}{3\delta I}$$

P : 하중(N)
 L : 부재 길이
 δ : 경간 거리(mm)
 I : 단면 2차 모멘트

재료 물성치

마찰면 마찰계수, 반력 측정



	MDF - MDF	MDF - A4	A4 - A4	MDF - 고무줄	A4 - 고무줄
하중(F)	3.1N	2.6N	2.55N	2.45N	2.06N
질량(m)	1kg	1kg	1kg	1kg	1kg
운동마찰계수	0.316	0.265	0.26	0.25	0.21

• 운동마찰력

$$F_k = \mu_k N$$

F_k : 마찰력
 μ_k : 마찰력
 N : 수직항력

-바닥판을 구성하는 MDF Plate와 각종 부재의 마찰계수 측정 결과-

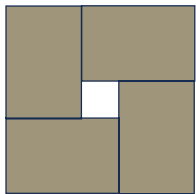
✓ 고무줄과의 마찰계수가 0.25로 가장 작게 측정

✓ A4와 고무줄의 마찰계수는 0.21로 가장 작게 측정

면진 구조의 원활한 작동을 위해 마찰계수가 가장 작은 A4 - 고무줄을 활용하여 면진 설계

기둥 단면 강성

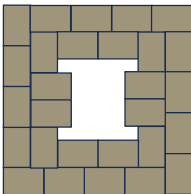
<Case 1>



$$I_x = 832mm^4$$

$$I_y = 832mm^4$$

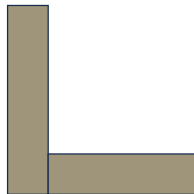
<Case 2>



$$I_x = 45,488mm^4$$

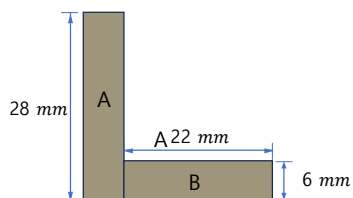
$$I_y = 45,488mm^4$$

<Case 3>



$$I_x = 45,488mm^4$$

$$I_y = 45,488mm^4$$



$$I_x(A) = \frac{6 \times (28)^3}{3} = 43,904mm^4$$

$$I_x(B) = \frac{22 \times (6)^3}{3} = 1,584mm^4$$

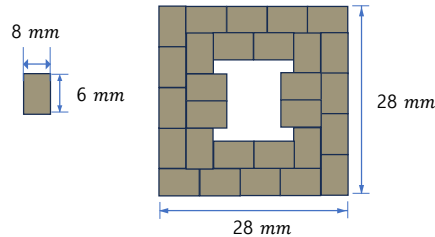
$$I_x = I_x(A) + I_x(B) = 45,488mm^4$$

$$I_y = 45,488mm^4$$

기둥 단면의 결정은 단면2차모멘트에 좌우. Strip을 사용하여 기둥을 구성하여 가장 보편적인 Case 1을 고려하였으나, Case 3에 비해 시공성과 경제성이 떨어지며 'ㄱ'자 형태는 다른 경우들보다 횡하중에 강하여 Case 3를 선택했다.

코어 단면 강성

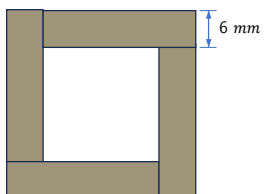
<Case 1>



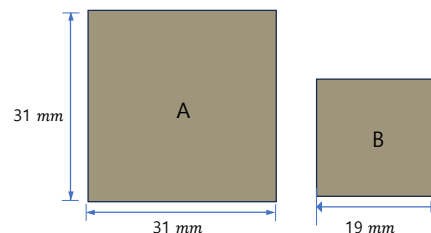
$$I_x = 45,488mm^4$$

$$I_y = 45,488mm^4$$

<Case 2>



$$I_x = I_y = 66,100mm^4$$



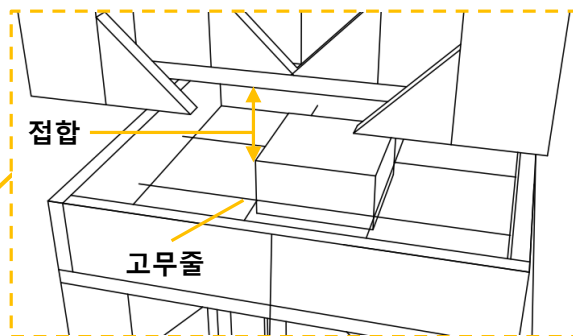
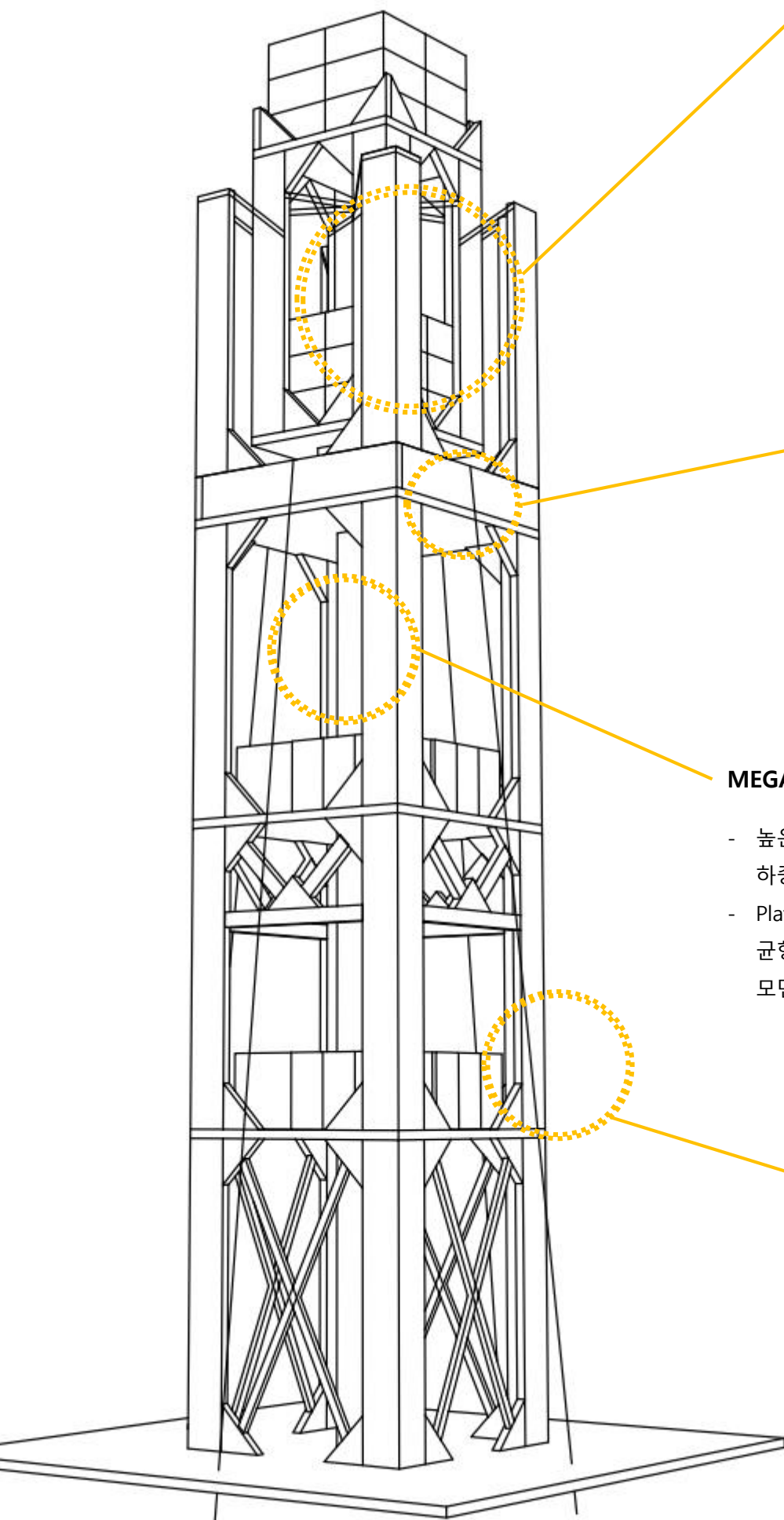
$$I_A = 76,960mm^4$$

$$I_B = 10,860mm^4$$

$$I_x = I_A - I_B = 66,100mm^4$$

$$I_y = 66,100mm^4$$

코어 기둥의 단면 또한 단면2차 모멘트가 더 큰 Case 2의 단면을 사용하여 경제성과 시공성, 구조적 안정성을 확보한다. Case 1의 경우 강성이 사용되는 부재 수를 고려하면 경제성이 필요하며, 접합 부위가 많아 시공성이 떨어지고 시공 시 주의가 필요하다.



면진 장치

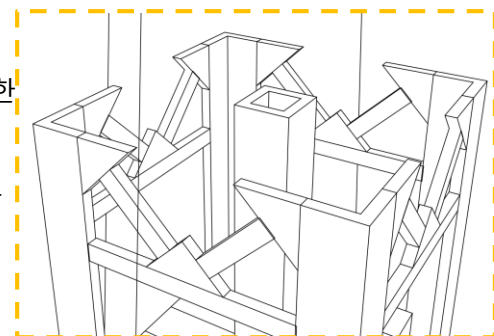
- 구조물 바닥에 plate로 틀을 만들어 부착, 제작된 틀은 바닥면과의 맞닿는 면을 줄여 마찰력 최소화
- 이 외에도 마찰력을 줄이기 위해 재료 물성치 값에 근거하여 마찰력이 가장 작은 고무줄을 틀 바닥에 붙여 시공
- 면진 원리가 적용된 구조물의 관성을 제어하여 상부에 고무줄을 외각의 기둥과 연결

와이어

- 기초판과 4층 바닥판에 연결시켜 인장력을 통해 외각 기둥 및 코어의 휨 및 전도 방지
- 동일한 원리로 면진층의 수평변위 제어
- 최종 붕괴 메커니즘은 0.7g ~ 0.8g 상응하는 가속도에 도달 시 고무줄의 장력 저하로 인한 면진이 적용된 구조물 상부가 구조물 전체의 무게중심을 이탈하여 붕괴

MEGA COLUMN

- 높은 강성, 강도로 구조물에 작용하는 거대한 하중 지지
- Plate를 사용해 길이 31mm의 정사각형으로 균형을 잡으며 가운데를 비우면서 단면 2차 모멘트를 최대화 하여 경제성 확보



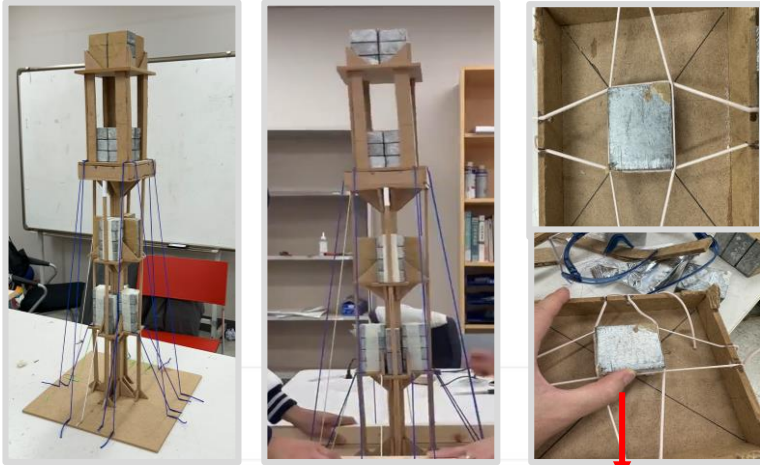
전단벽

- 'ㄱ' 형 단면으로 인한 $x - y$ 축 방향 횡하중에 대한 효과적인 저항
- 각 모서리에 설치되어 편심하중 발생 방지

- 전체적인 내진설계는 중심의 메가 칼럼을 기준으로 진행
- 전단벽을 통해 횡하중과 편심하중 발생에 대한 안정성 확보
- 가새, 거셋 플레이트 등을 활용하여 추가적으로 보완한다.

실험 및 분석

1차 모델 제작 및 실험



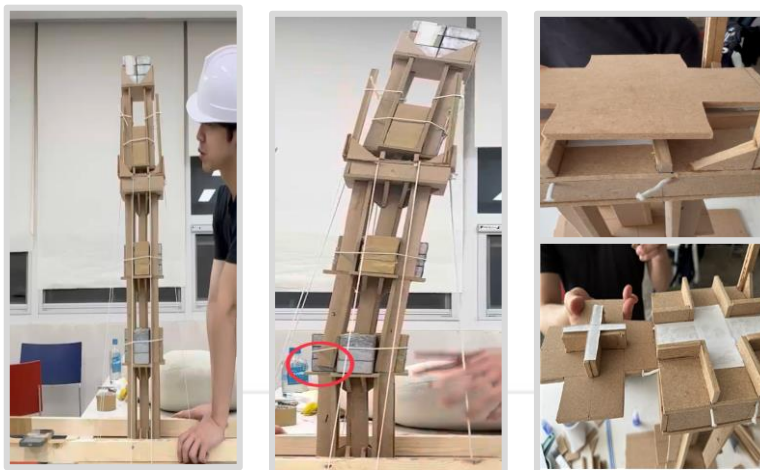
탄성력

0.1g 파괴

(시작 전 MDF Strip으로 우물정자 슬라브 모형을 만들어보았으나
기둥 부착성 향상을 위해 MDF Plate로 변경)

- **파괴 원인** : 코어를 둘러싼 외각기둥의 세장비가 지나치게 커
상부구조의 하중을 2층 외각 기둥이 지탱하지 못하고 파괴
- **수정** : 기둥을 MDP strip가 아닌 MDF plate로 변경하여 실험을
재진행 -> 1층 기둥과 2층 바닥판이 분리
- **대책** : 기둥과 슬라브의 접촉면적과 부재 자체의 강성을 높이기 위해
기둥 설계 변경

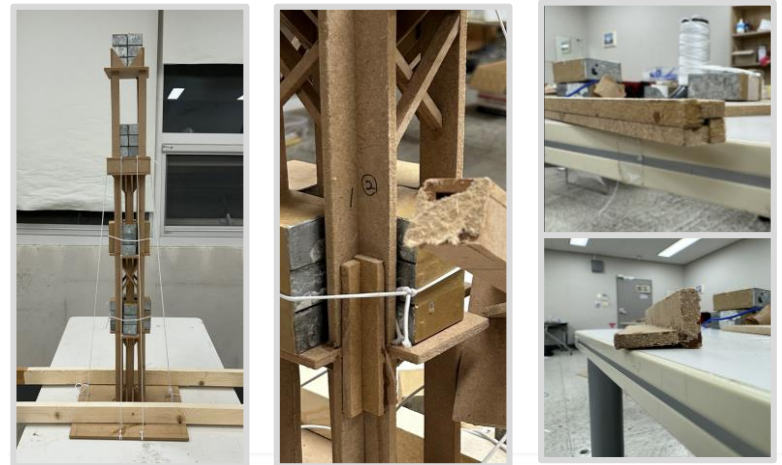
3차 모델 제작 및 실험



0.35g 파괴

- **파괴 원인** : 1. 바닥에 열십자형 레일을 설치한 면진층을 제작하여
4층부가 움직이긴 하였으나 모듈이 열십자형 레일에
충돌하여 발생하는 충격력으로 인해 2층부 파단
2. 1~3차 모델에서 설계한 바닥판의 면적이 작아
건물이 세장하여 전도할 가능성이 높음
- **확인** : 1. 상부 구조물의 변위를 제어할 수 있는 면진 설계의 필요성
확인
2. 각 층 바닥판과 기둥의 접촉면적 개선
- **대책** : 면진 모듈의 개선, 바닥판의 크기를 키워 건물의 세장함 개선,
기둥과 바닥판에 거셋플레이트를 보강하여 기둥과 바닥판
분리 방지

2차 모델 제작 및 실험



0.19g 파괴

- **파괴 원인** : 2차 모델보다 외각기둥과 슬라브의 접촉면적 및 강성을
증대하였으나, 진동 시 상층부의 하중에 저항하지 못하고 2층
기둥과 2층 바닥판이 분리된 후 3층 코어 기둥이 분리됨
- **확인** : 접촉면적을 증가시키는 것의 실효성 확인
- **대책** : 기둥과 슬라브의 접촉면적과 부재 자체의 강성을 높이기 위해
기둥 설계 변경

4차 실험 제작 및 실험



0.44g 파괴

- **파괴 원인** : 1. 면진층의 이탈을 잡아주는 외곽 기둥 부재가 세장함에
따라 옥상 면진층 파괴
2. 면진층 모듈과 하부 판의 마찰력이 커 하중이 올라간 후
면진층의 거동이 제대로 이루어지지 않음
- **확인** : 1. 건물의 세장함을 개선한 설계의 실효성 확인
2. 거셋플레이트의 실효성 확인
3. 제진댐퍼의 실효성 의문(0.5kg 하중블록의 거동에만
의지한 댐퍼의 제진성능 불확실함 확인
- **대책** : 면진 모듈과 바닥판의 마찰력 개선 필요, 외곽 기둥의 강도
증대 필요

최종 실험, 면진층 거동분석

최종 모듈 설계



- 불확실한 성능의 제진 댐퍼 제거
- 면진층 모듈 바닥에 string을 부착 (바닥판과의 마찰력을 줄여 면진층 거동 성능 개선)
- 코어에 부착된 거셋플레이트 제거하고 외곽기둥에 거셋플레이트를 보강함에 따른 기둥과 바닥판의 접착성능 향상



벨트 트러스



하부층 강성 개선

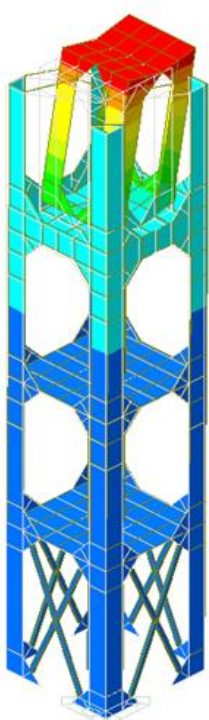


고무줄 장력 조절

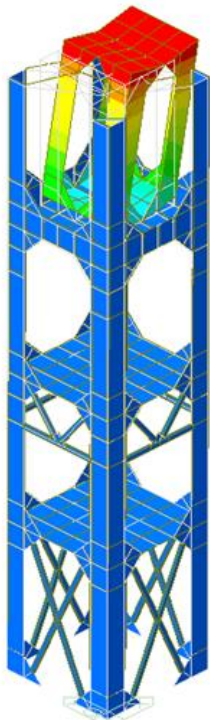
MIDAS 분석

Midas gen 응답스펙트럼 해석

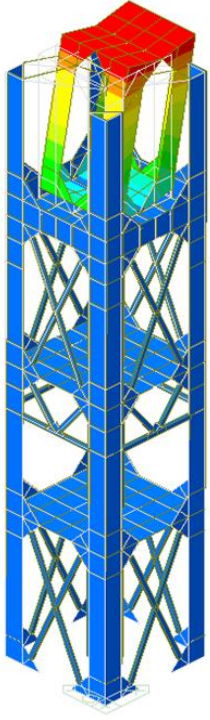
Module A



Module B



Module C



X자 가새

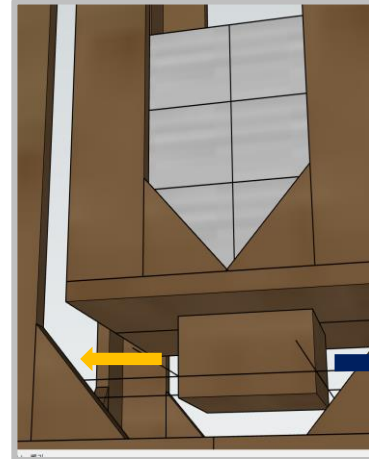
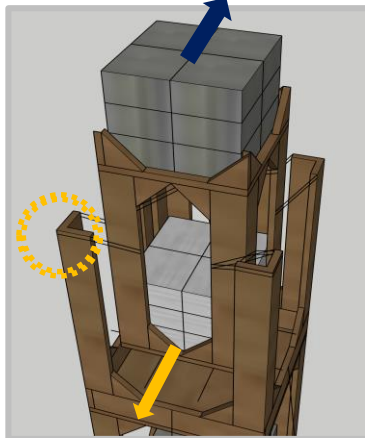


벨트 트러스

- Midas gen을 활용한 응답스펙트럼 분석은 구조물이 외부하중(지진)에 대해 어떻게 반응할 것인지(변위)를 평가하는 방법이다.
- Midas gen을 활용한 변위 해석 결과 Module A와 B는 유의미한 변위값의 차이가 있었으나, Module B와 C는 미비한 차이를 보여 경제성과 시공성을 고려하여 **Module B**를 선택했다.

- **Module A** = 1층 X자 가새
- **Module B** = Module A + 2층 벨트 트러스
- **Module C** = Module B + 3층 X자 가새

면진층 거동분석



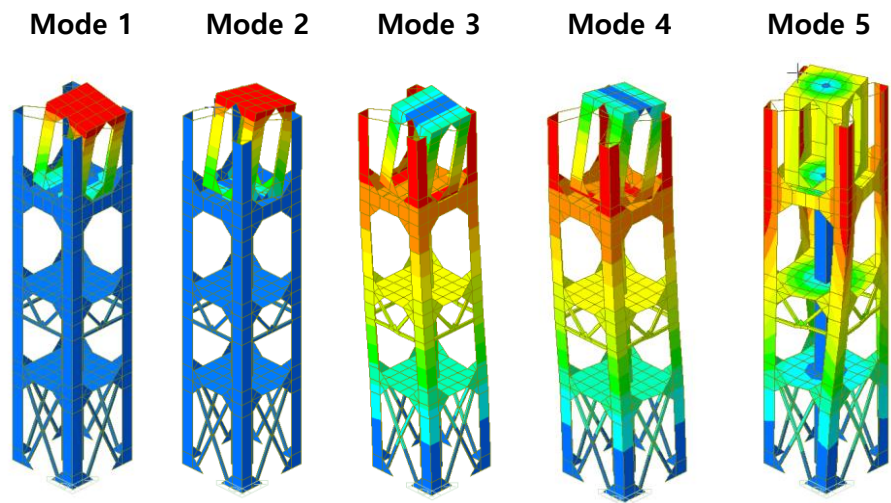
실제 구조물 거동분석



- 면진층은 구조물의 관성과 반대로 작용하며 면진층 기둥과 외곽 기둥에 연결된 고무줄, 면진층 밑 모듈에 부착된 고무줄의 탄성을 통해 전체적인 구조물의 진동을 제어한다.

MIDAS 분석

Midas gen 고유주기 산정



Mode	UX	UY	UZ	RX
EIGENVALUE ANALYSIS				
Mode No.	Frequency		Period	Tolerance
	(rad/sec)	(cycle/sec)	(sec)	
1	1.5979	0.2543	3.9322	1.7394e-016
2	1.5979	0.2543	3.9322	1.7393e-016
3	20.5473	3.2702	0.3058	9.4247e-016
4	20.5473	3.2702	0.3058	2.1946e-014
5	51.9868	8.2740	0.1209	6.3969e-011

<고유치 해석>

- 고유값(eigenvalue):
고유치해석에서는 구조물의 진동 모드(고유모드)와 그에 따른 고유진동수를 계산하기 위해 고유값을 측정한다. 고유값은 주어진 시스템의 진동 방정식에서 필요한 값 중 하나로, 진동모드의 진동 주파수를 결정하는 요소이다.
 - 고유모드(eigenmode):
고유모드는 구조물이나 시스템이 진동할 때의 특정 진동 패턴이나 형태를 의미한다. 각 고유모드는 해당 고유진동수와 연결되어 있으며, 고유진동수에 따라 진폭과 방향이 결정된다.
 - 고유진동수(eigenfrequency):
고유진동수는 구조물이나 시스템이 특정 진동 모드에서 진동할 때의 진동 주파수를 의미한다. 각 고유진동수는 해당 고유모드에 대응되며, 시스템의 진동 특성을 결정하는 중요한 요소이다.
- 고유치해석(Free Vibration Analysis)을 수행하면 각 고유모드에 대한 결과로 모드 형상과 고유진동수가 나타난다. 이때 각 모드 형상은 구조물이 진동할 때의 진동패턴을 의미하며 1~5번 모드로 갈 수록 낮은 진동주파수를 갖는다.
 - Midas Gen을 활용하여 구조물의 질량과 강성에 의해 결정되는 구조물의 동적특성(고유모드, 고유주기, 모드기여계수)를 측정한다.

붕괴 메커니즘

모듈 붕괴 메커니즘



- <구조 계산>
- 지진 발생 시 면진층 상부 구조물의 무게중심에 가속도 a가 작용하며 상부 구조물의 질량과 가속도의 곱에 해당하는 힘(전도 모멘트)이 발생한다. $M=Fd$
 - 따라서 0.7g에 상응하는 전도 모멘트에 대하여 설계 모멘트를 더 작게 설계한다.
 - 고무줄 한 줄: 0.6g 이전의 전도 모멘트에 대하여 저항하지 못하고 고무줄이 파단 또는 소성상태가 되어 불안정하다.
 - 고무줄 세 줄: 상부 구조를 잡아주는 고무줄의 탄성력이 강하여 면진 메커니즘이 잘 작동하지 않아 0.7g 도달 이전에 붕괴하는 양상을 보인다. 또 각 기둥에 연결된 고무줄의 강한 탄성력에 의해 기둥이 견디지 못하고 뺨힌다.
 - 고무줄 두 줄: 0.6g에 상응하는 전도 모멘트보다 설계 모멘트가 크므로 안정하다. 또한 0.7g 이상의 전도 모멘트에 대해서는 고무줄이 면진층 변위 한계를 넘어서며 전도된다.

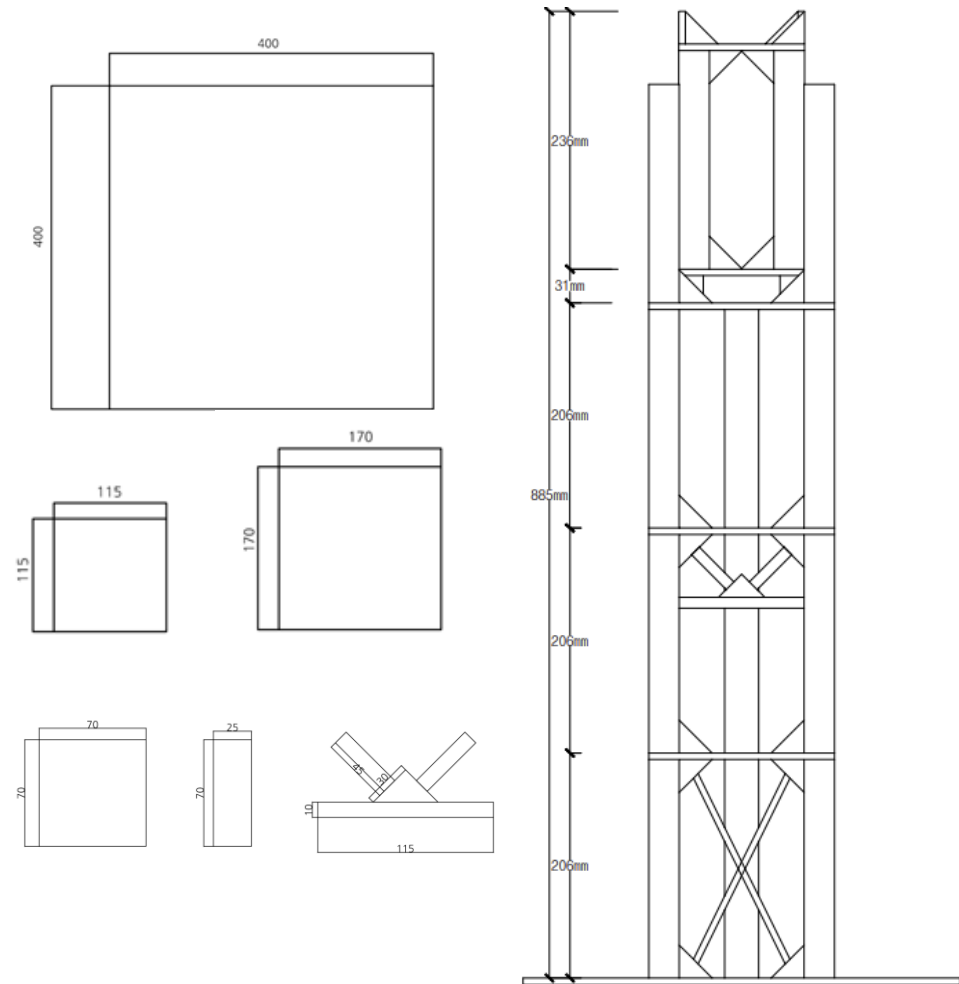


고무줄을 두 줄로 상부구조를 지지하여 붕괴 메커니즘을 구성한다.

평면도 & 입면도

평면도

입면도



경제성 분석

부재명	부재 규격(가로 X 세로 X 높이)	수량	부재명	부재규격(가로 X 세로 X 높이)	수량
기둥부재-A	28mm X 6mm X 200mm	20	거šet 플레이트	30mm X 30mm X 30mm	84
기둥부재-B	22mm X 6mm X 200mm	20	면진층 바닥 고무줄	200mm	4
바닥	170mm X 170mm X 6mm	4	옥상 고무줄	600mm	2
옥상층 바닥	120mm X 120mm X 6mm	1	댐퍼 벽면	144mm X 6mm X 30mm	4
가새	10mm X 6mm X 190mm	8	면진층 A4지	200mm X 200mm	1
코어	25mm X 6mm X 200mm	12	접착제	20g	2

부재명	부재 규격(가로 X 세로 X 높이)	단가(백만원)	수량	합계(백만원)
MDF Plate	400mm X 400mm X 6mm	-	1	-
MDF Strip	200mm X 200mm X 6mm	100	12	1200
MDF Plate	600mm X 6mm X 4mm	10	-	-
스트링 고무줄	600mm	40	6	240
A4 용지	A4	10	1	10
접착제	20g	200	2	400
총액				1850

시공성 분석

구분		소요 시간										
		1시간				2시간				3시간		
		15분	30분	45분	60분	15분	30분	45분	60분	15분	30분	+α
설계	기둥, 코어											
	보강재 및 슬래브											
제작	기둥, 코어											
	슬래브 제작 및 천공											
	보강재											
	면진층 제작											
	면진층 모듈 제작											
시공	기둥, 슬래브 시공											
	가새, 거šet플레이트											
	면진층 설치											
	고무줄 설치											
마감	하중블럭 설치											
	진동대 기초판 연결											
총 공정 시간										2시간 15분		